第40卷 第9期
2023年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 9
Sep. 2023

黑河中游正义峡径流变化趋势及归因分析

胡广录[1,2]，陶 虎[1]，焦 娇[1]，白元儒[1,2]，陈海志[1]，麻 进[1]

（1. 兰州交通大学环境与市政工程学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省黄河水环境重点实验室，甘肃 兰州 730070）

摘 要：以黑河中游正义峡水文站的实测径流量数据为基础，采用线性回归法、Mann-Kendall突变检验法、滑动t检验法、Pettitt检验法和累积距平法分析了正义峡水文站1970—2020年径流序列的变化趋势和突变年份，并利用基于Budyko假设的水热耦合平衡方程，对正义峡径流量变化趋势进行了归因分析。结果表明：(1) 研究期内正义峡径流量波动变化，丰枯交替，但整体呈现增加趋势，2004年径流发生突变，突变后的年平均径流量增加了$3.08\times10^8\ m^3$，增加率为32.7%。(2) 突变后的2005—2020年，正义峡径流量对降水、潜在蒸发和下垫面参数的弹性系数分别为1.40、-0.40、-1.57，且各因子对径流的贡献率分别为42.73%、-12.52%、69.79%，表明径流量对下垫面变化最为敏感，气候因子中降水对径流的影响大于潜在蒸发。(3) 在一定的区域气候条件下，植被覆盖、土地利用、流域调水等人类活动引起的中游下垫面变化是正义峡径流量变化的主要原因。研究结果可为流域管理部门制定水资源合理分配及调用方案提供科学依据。

关键词：径流变化；归因分析；水热耦合平衡方程；气候变化；人类活动；黑河中游

在全球气候变暖的背景下，降水、气温、蒸发等气象因素均发生了不同程度的变化，进而导致全球许多河川径流也发生了显著变化[1-2]。我国西北地区对气候变化的响应更加敏感，近几十年来，在气温升高、降水量增加和冰冻圈退缩等众多因素的影响下，该区域水资源时空分布更加不合理，极大影响了生态系统稳定[3-4]。与此同时，随着“西部大开发”战略举措的实施推动和区域社会经济发展水平的不断提高，西北地区的土地利用格局也发生了较大的改变，也直接或间接地影响着流域产汇流过程，并导致一些河川径流量的增多或减少，这种变化对于区域水循环产生了深远的影响[5]。因此，探究西北内陆河径流变化特征及影响因素，对于深刻认识干旱区的生态环境演变和保障社会经济可持续发展具有重要意义。

目前，许多学者对西北干旱地区内陆河流域径流变化及其影响因素开展了大量研究。有学者研究发现，气候变化是导致玛纳斯河和塔里木河径流变化的主要影响因素，其中降水增加直接影响径流量增加，随着气温增加，冰川融雪增加，间接影响玛纳斯河和塔里木河径流量增加[6-9]。也有学者对河西走廊三大内陆河出山径流进行分析研究，结果表明石羊河径流减少，黑河与疏勒河径流呈现增加趋势，三大内陆河的出山径流变化受祁连山山区气温影响较大，其中夏季受降水影响较大，冬季和春季则受气温升高导致的冰川融雪影响较大，山区人类活动较少，对出山径流的影响较小[10-14]。通过对现有的众多研究成果进行分析研判，发现大多数研究主要集中于内陆河出山径流量变化的影响因素的分析，这些研究都表明气候因子和人类活动共同对水文循环过程、河川径流演变产生影响，二者的作用经常互相交织并相互影响，其中主导因素为气候变化。内陆河中游一般拥有适宜的气候条件和广袤的土地资源，是工农业生产和人口的集中分布区，同时也是水量消耗最多的区域。在这个区域学者们关注更多的是流域调水、农业用水、水资源承载力、土地利用和植被生态建设[15-19]。中游也因为人类活动影响频繁，水文循环过程更趋复杂，径流

收稿日期：2023-04-19； **修订日期**：2023-07-17
基金项目：国家自然科学基金项目(41867074，41561102)；甘肃省水利厅水利科学试验研究技术推广项目(甘水建管发[2021]71号)
作者简介：胡广录(1966-)，男，教授，博士，研究方向为水文学及水资源. E-mail: hgl0814@163.com

变化研究结果的时效性、可比性也欠佳,对中游径流变化及其影响因素的研究尚显不足。因此,加强内陆河中游径流演变和影响因素的分析研究,对于揭示该区域水文效应的变化机理和如何应对水资源管理挑战很有必要。

黑河是我国第二大内陆河,横跨青甘蒙三省区,作为西北重要的生态功能区和生态安全屏障,承担着水源涵养、生物多样性保护和防风固沙等诸多重要的生态功能,并发挥着极其重要的生态作用。正义峡地处甘肃省张掖市、酒泉市和内蒙古额济纳旗三方交界之地,是黑河干流中游和下游的分界点,探究黑河中游正义峡径流演变规律和影响径流的主要因素,对保障中下游生产生活用水及维护区域生态安全意义重大。本文以黑河中游长序列径流、气象和土地利用等数据资料为依据,综合M-K突变检验法、滑动*t*检验法、Pettitt检验法、累积距平法对中游正义峡径流演变从时间尺度上进行分析,并采用Budyko模型探究径流变化的主要影响因素。研究结果可为变化环境下黑河中游地区水资源合理开发利用与科学配置提供参考依据。

1　研究区概况与方法

1.1　研究区概况

黑河(98°30′~101°30′E,37°50′~42°40′N)发源于祁连山北麓,出山口莺落峡以上为上游,莺落峡至正义峡之间为中游,正义峡以下为下游。黑河中游地处甘肃河西走廊的中部,河道全长185 km,区域面积2.56×10^4 km^2,属温带干旱区,年温差较大,年日照时数长达3000~4000 h,年均温度7~8 ℃、降水量110~150 mm、蒸发量1300~2400 mm、相对湿度52%[19-20]。黑河干流沿线的甘州、临泽、高台三县(区)为河西走廊主要商品粮生产基地,也是中游地区河川径流的主要消耗区(图1),近年来受人类活

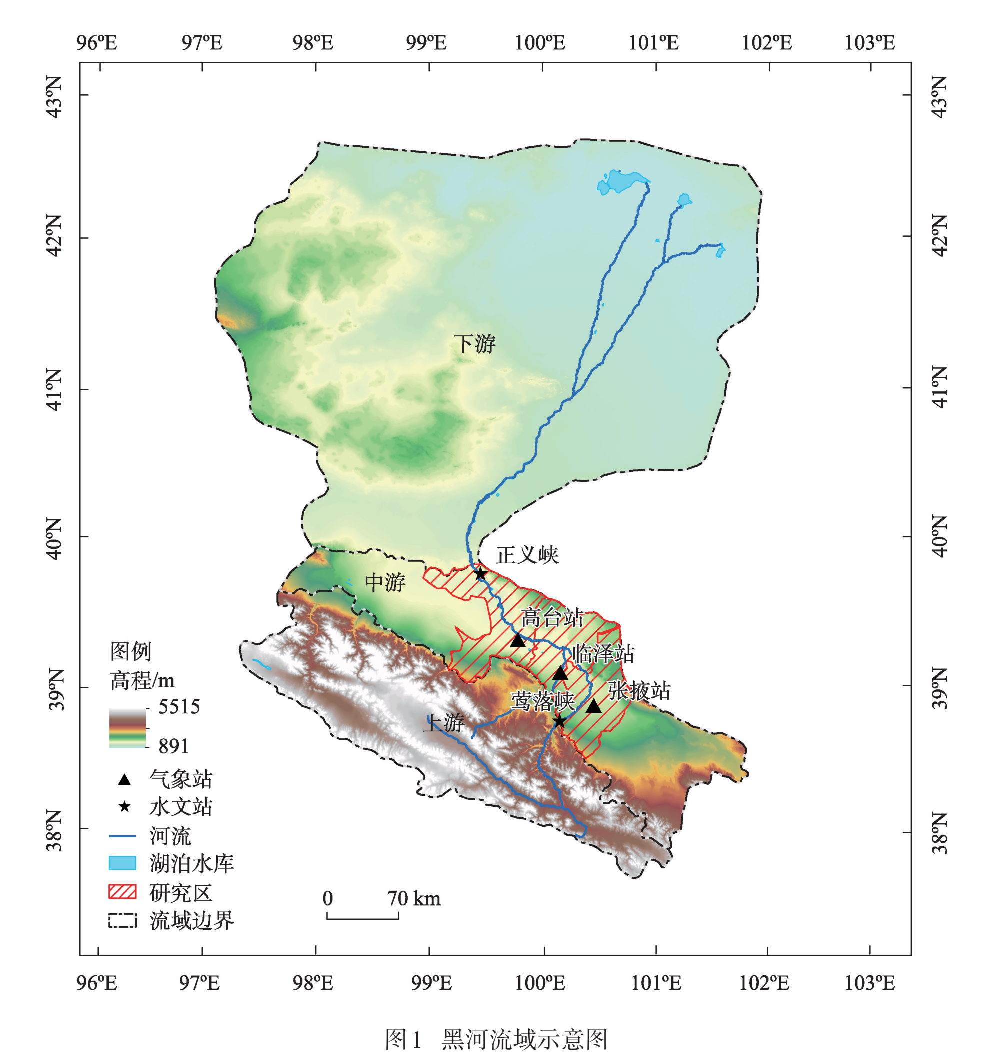


图1　黑河流域示意图

Fig. 1　Map of Heihe River Basin

动和气候变化的影响,黑河中游干流的年径流量发生了明显变化。

1.2 数据来源

正义峡水文站是黑河中游的国家基本水文站。本文系统性地收集了正义峡水文站1970—2020年的年径流资料,来自甘肃省水文水资源局;同时收集了中游地区高台、临泽、张掖三个气象站点1970—2020年的气象数据,来自国家气象科学数据中心中国气象数据网(http://data.cma.cn),包括降水、湿度、日照时数、气温、风速等资料;归一化植被指数(NDVI)来自中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn);潜在蒸发量ET_0采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的彭曼-蒙特斯公式(Penman-Monteith)计算获得。

1.3 研究方法

1.3.1 *趋势和突变检验* 采用线性回归法、5 a滑动平均法对正义峡水文站1970—2020年径流量变化趋势进行分析;利用Mann-Kendall突变检验、滑动t检验、Pettitt检验法和累积距平法进行径流突变检验,确定年径流序列的突变点。

(1) M-K突变检验,对时间序列构建一个服从标准正态分布的秩序列UF,再将时间序列逆序排列,对逆序排列后的新序列构建一个新的秩序列UB,则UF和UB两条曲线的交点即为时间序列的突变点。

(2) 滑动t检验,任取一点作为基准点,则该基准点把时间序列分为两段子序列,如果两段子序列的均值差异超过了一定的显著性水平,则认为有突变发生,即该点为时间序列的突变点。

(3) Pettitt检验,在连续的时间序列中,假设一个时间点为突变点,检验该点前后两段数据的累积分布函数是否有显著差异,有显著差异则表明该点为时间序列的突变点。

(4) 累积距平法,计算时间序列的多个累积距平值并绘制累计距平曲线图,曲线上升表示距平增加,曲线下降表示距平减小,根据曲线的起伏变化可以判断出时间序列的变化趋势和发生突变的时间。具体计算方法参照文献[12-13]所述。

1.3.2 *径流变化归因分析* 采用基于Budyko假设水热耦合平衡原理的弹性系数法[21-23]量化气候因素和人类活动对正义峡径流量的影响。

(1) 一般认为流域多年蓄水量变化可忽略不计,则基于Budyko假设提出了流域水热耦合平衡方程如下:

$$E = \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \tag{1}$$

$$R = P - E = P - \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \tag{2}$$

式中:R为径流深(mm);P为降水量(mm);E为实际蒸散发量(mm);n为流域下垫面参数; ET_0为潜在蒸散发(mm·d^{-1})。

(2) 假设P、ET_0、n为相互独立的变量,公式(2)可写为$R=f(P、ET_0、n)$,则径流深的微分表达式为:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial P}dP + \frac{\partial R}{\partial ET_0}dET_0 + \frac{\partial R}{\partial n}dn \tag{3}$$

(3) 用弹性系数ε_X表示径流R对X因子的敏感性,其含义为单位影响因素的变化引起的径流变化量,其表达式为:

$$\varepsilon_X = \frac{\partial R}{\partial X} \cdot \frac{X}{R} \tag{4}$$

对公式(3)等式两边同时除以平均径流深R并结合公式(4)整理可得:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_P \frac{dP}{P} + \varepsilon_{ET_0} \frac{dET_0}{ET_0} + \varepsilon_n \frac{dn}{n} \tag{5}$$

(4) 令$\varphi = \frac{ET_0}{P}$,则结合公式(2)、公式(4)和公式(5)可得降雨(P)、潜在蒸散发(ET_0)和下垫面条件(n)的弹性系数分别为:

$$\varepsilon_P = \frac{(1+\phi^n)^{1/n+1} - \phi^{n+1}}{(1+\phi^n)[(1+\phi^n)^{1/n} - \phi]} \tag{6}$$

$$\varepsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1+\phi^n)[1-(1+\phi^{-n})^{1/n}]} \tag{7}$$

$$\varepsilon_n = \frac{\ln(1+\phi^n) + \phi^n \ln(1+\phi^{-n})}{n[(1+\phi^n) - (1+\phi^n)^{1/n+1}]} \tag{8}$$

(5) 用dR'表示基于降雨(P)、潜在蒸散发(ET_0)和下垫面条件(n)变化,通过Budyko假设而计算出的突变前后径流深的变化量,dR_P、dR_{ET_0}、dR_n分别表示降雨、潜在蒸散发和下垫面条件发生变化而引起的径流量变化量[21]:

$$dR' = dR_P + dR_{ET_0} + dR_n = \varepsilon_P \frac{R}{P}dP + \varepsilon_{ET_0}\frac{R}{ET_0}dET_0 + \varepsilon_n \frac{R}{n}dn \tag{9}$$

式中:dP、dET_0、dn为P、ET_0、n在突变前后两段时间多年平均值的差值,则降雨(P)、潜在蒸散发(ET_0)和下垫面条件(n)对径流深的贡献率(C)分别为:

$$C_P = \frac{dR_P}{dR'} \times 100\% \tag{10}$$

$$C_{ET_0} = \frac{dR_{ET_0}}{dR'} \times 100\% \tag{11}$$

$$C_n = \frac{dR_n}{dR'} \times 100\% \tag{12}$$

2 结果与分析

2.1 径流变化趋势分析

2.1.1 径流变化趋势 正义峡水文站为黑河中游干流上的主要控制站,1970—2020年正义峡水文站年径流量的变化情况如图2。由图2可以看出,正义峡水文站多年平均径流量为10.4×10^8 m^3,最大值出现在2017年,为15.92×10^8 m^3,最小值出现在1997年,为5.13×10^8 m^3。1970—1990年呈现出明显的丰枯年交替变化,1990—2005年基本处于枯水年份,2006—2020年基本处于丰水年份。从线性拟合情况来看,年径流量总体呈增加趋势,变化率为0.0475×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$。从5 a滑动平均曲线来看,径流量总体呈上升-下降-上升的波动变化趋势。1990年以前5 a滑动平均曲线小幅波动,基本位于平均值上下,表明1970—1990年这一时期正义峡站年径流量比较稳定且基本接近多年平均值;1990—2007年曲线位于多年平均值下方,说明这段时间内正义峡站年径流量较少,其中,1990—1994年曲线下降趋势明显,1995—2003年较为稳定;从2004年开始,5 a滑动平均曲线呈现明显的上升趋势,表明自2004年开始年径流量较往年增多,这有可能与2000年开始实施的黑河中游调水活动有关。

2.1.2 径流突变检验 正义峡水文站年径流量的突变检验如图3所示。图3a为M-K突变检验,图中*UF*统计量呈现先上升、后下降、再上升的波动趋势,且*UF*统计量在1970—1989年,除1980年、1986年、1987年、1988年以外,其余年份均为正值且处在0.05显著水平临界线(+1.96)内,表明正义峡水文站年径流量在此段时间呈现震荡上升趋势;1989—2013年*UF*统计量为负值,其中1997—2006年明显超过0.05显著水平临界线(-1.96),表明1989—2013年正义峡水文站年径流量呈现下降趋势,且1997—2006年下降趋势显著;*UF*和*UB*两条曲线相交于2014年左右,根据M-K突变检验规则可知,正义峡水文站年径流量在2014年前后发生了一次突变。图3b为滑动*t*检验,图中统计量*t*在2004年、2013年左右超出给定*P*=0.05显著水平临界线,其中,最小值出现在2004年,表明正义峡水文站年径流量在2004年和2013年前后分别发生了显著突变,其中2004年突变极显著。图3c为Pettitt检验,图中统计量*UT*曲线在1970—1990年变化较为平缓,1990—2005年呈现下降趋势,2005年后波动上升,并超过*P*=0.05显著水平临界线。根据Pettitt突变检验中最显著的可能突变点为统计量*UT*绝对值的最大值规则,图3c中*UT*绝对值的最大值出现在2005年且超过0.05显著水平临界值,因此,可以得出正义峡水

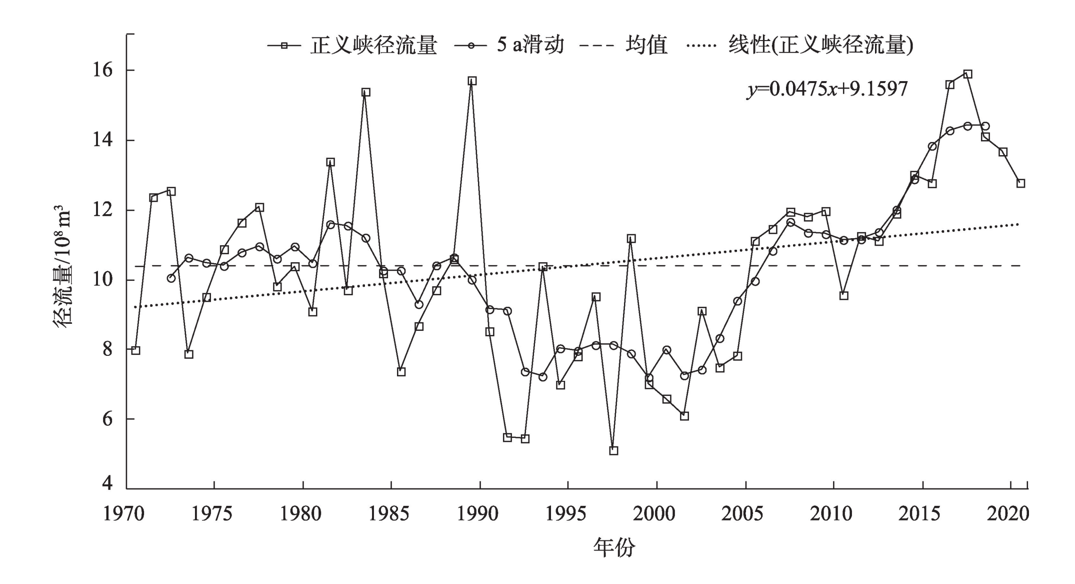


图2 正义峡水文站年径流变化趋势

Fig. 2 Trend of annual runoff change at Zhengyi Gorge hydrological station

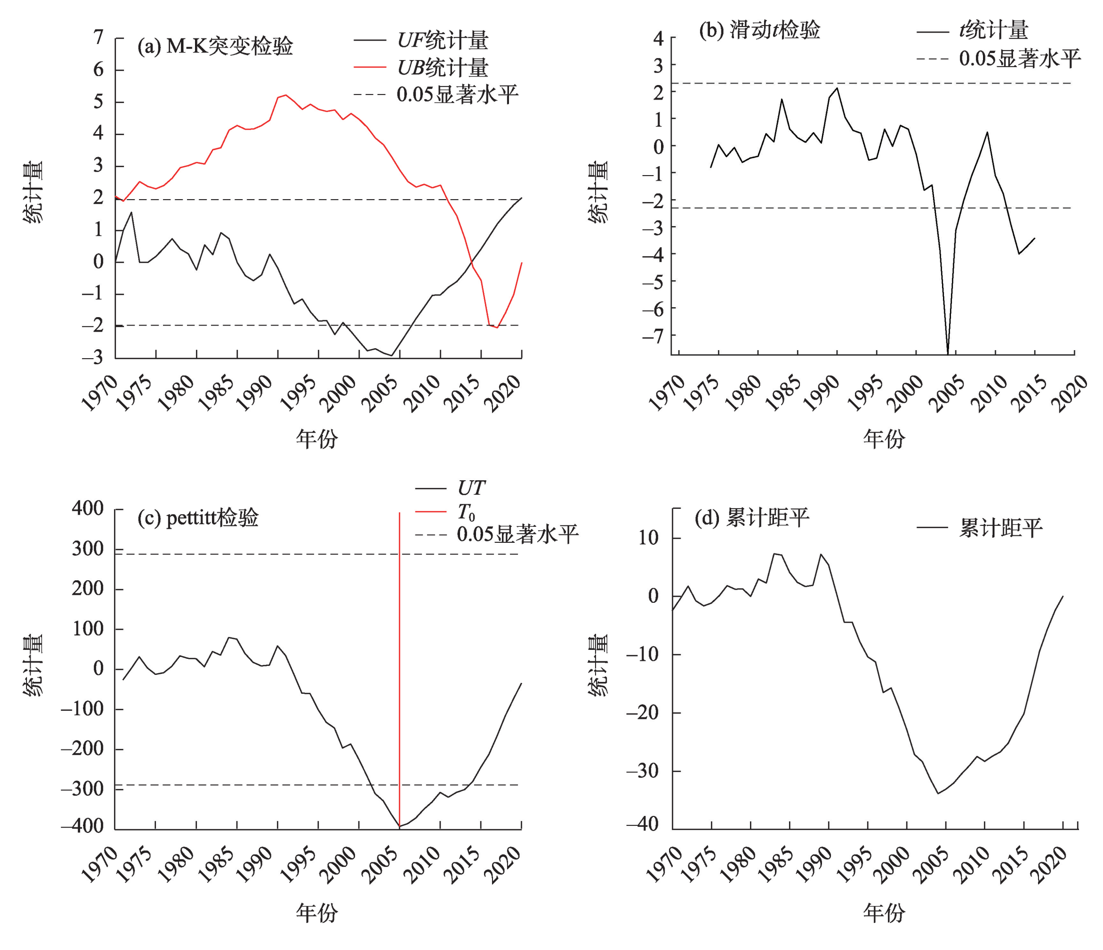


图3 正义峡水文站年径流突变检验

Fig. 3 Test for annual runoff mutation at Zhengyi Gorge hydrological station

文站年径流量可能在2005年前后发生了一次显著突变。图3d为累积距平曲线，由图可以看出正义峡水文站年径流量累积距平曲线从1970—1989年呈现上升趋势但不显著；从1989—2004年整体呈现明显的单调下降趋势，且下降幅度较大，说明在此段时间内正义峡水文站年径流量较少；自2004年后，累计距平曲线呈现显著的单调上升趋势，表明年径流量增加趋势明显；年径流量累积距平在2004年前后发生了先减小后增大的转折变化，这表明正义峡水文站径流量可能在2004年前后发生了一次突变。

由上述分析结果可知，利用M-K突变检验、滑动t检验、Pettitt检验和累积距平法四种方法对正义峡水文站径流量的突变检验结果不完全一致，但其中三种方法均表明突变点在2004—2005年前后。结合图2中年径流变化趋势综合考虑后，最终确定正义峡水文站径流的突变时间点为2004年，这与吴凯等[15,19,24]的研究结果一致。

突变前后径流变化情况见表1。由表1可知，突变后正义峡水文站的年平均径流量与突变前相比存在较大幅度的增加，年平均径流量由突变前的9.43×10^8 m^{3}增加到突变后的12.51×10^8 m^3，增加率为32.7%；变异系数C_v由0.28变为0.13，表明突变后径流量年际间变异程度更小、变化更趋稳定。

2.2 径流变化归因分析

2.2.1 敏感性分析 黑河干流中游区域面积为2.56×10^4 km^2，采用正义峡水文站多年实测径流量资

表1 正义峡径流突变前后对比

Tab. 1 Comparison before and after the abrupt change in the runoff of Zhengyi Gorge

水文站点	突变点		突变前		突变后		变化率/%
	年份	显著性	径流量/10^8 m^3	变异系数(C_v)	径流量/10^8 m^3	变异系数(C_v)	
正义峡	2004	0.05	9.43	0.28	12.51	0.13	32.7

料,计算径流深R;利用中游地区高台、临泽、张掖三个气象站的实测数据,通过Penman-Monteith公式计算出中游地区的潜在蒸发量ET_0。

以2004年作为分界点,将研究期(1970—2020年)划分为基准期(1970—2004年)和变化期(2005—2020年)。根据多年平均的径流深(R)、降水量(P)以及潜在蒸发量(ET_0)计算下垫面参数n、径流系数α(R/P)和干燥指数K(ET_0/P),再通过相关文献中的公式[21-23]计算得到不同时期的P、ET_0、n分别所对应的弹性系数(ε),计算结果见表2。

由表2可知,正义峡水文站变化期的R、P、ET_0与基准期相比均有所上升,上升速率分别为38.02%、9.84%和10.01%,径流深上升幅度较大。径流系数α较基准期有所上升,表明变化期增加的降水转化为径流的比例比基准期高,干燥指数(K)则基本维持不变,符合温带干旱区的气候特征。ε_p为正值,表示降雨量(P)与径流深(R)呈正相关关系,当P每增加1 mm时,R的增加量为1.4 mm,但ε_p从基准期的1.49减少至变化期的1.40,表明正相关性有减弱趋势,这可能与潜在蒸发量ET_0和下垫面参数n与径流深的负相关性减弱有关。因为当ET_0和n分别增加1 mm或1时,径流深的减少量由基准期的0.49 mm变为变化期的0.40 mm,或由1.79 mm变为1.57 mm。说明径流变化不单纯受某一变量(P、ET_0、n)的影响,而是多变量综合影响的结果。

弹性系数(ε)的绝对值越大表明径流对影响因子的敏感度越高[21]。由此可知,研究期内正义峡水文站径流对下垫面参数(n)的敏感度最强,对潜在蒸发量(ET_0)的敏感度最弱。

2.2.2 *归因分析* 通过Budyko水热耦合平衡方程计算各影响因子对径流变化的贡献率,结果见表3。

由表3可知,根据Budyko模型计算得到的径流深变化量(dR')为14.3 mm,实际径流深变化量(dR)值为13.69 mm,径流深变化量的相对误差为4.46%,小于5%[11,22],说明Budyko模型适用于该区域的径流变化研究。变化期内,P、ET_0和n对径流的贡献程度有较大差异,气候因素(P和ET_0)对正义峡水文站径流的贡献率为30.21%,其中降水引起的径流深的变化量为6.11 mm,贡献率42.73%,潜在蒸发引起的径流深的变化量为-1.79 mm,贡献率-12.52%;下垫面引起的径流变化量为9.98 mm,贡献率69.79%。综上可知,正义峡水文站径流量变化主要归因于下垫面参数的变化,气候因素中降水量变化对径流量的影响相对较大,潜在蒸发量变化的影响次之。

3 讨论

3.1 气候变化对径流的影响

已有研究表明,各种形式的大气降水是径流的直接补给源,因此,降水对径流产生直接影响;区域气侯以及下垫面条件决定蒸散发程度和空间格局,进而对区域径流形成以及径流量大小产生影响;近60 a来黑河流域径流总体呈现出增多趋势,其变化主要受气温与降水的影响,其中降水影响更大[15-19]。为了进一步分析黑河中游正义峡径流量变化与气候因子之间的关系,根据已知资料对径流量与降雨量、气温以及潜在蒸发量之间的相关性进行分析(图4)。

表2 正义峡不同时期水文气象变量特征

Tab. 2 Characteristics of hydrometeorological variables in Zhengyi Gorge in different periods

水文站	时期	R/mm	P/mm	ET_0/mm	n	α	K	ε_p	εET_0	ε_n
正义峡	基准期(1970—2004年)	36.01	118.90	897.80	0.66	0.30	7.55	1.49	−0.49	−1.79
	变化期(2005—2020年)	49.70	130.60	987.60	0.58	0.38	7.56	1.40	−0.40	−1.57

注:R为多年平均径流深;P为降水量;ET_0为潜在蒸发量;n为下垫面参数;α为径流系数;K为干燥指数,ε_p、εET_0、ε_n分别为P、ET_0、n所对应的弹性系数。下同。

表3 正义峡径流变化归因分析结果

Tab. 3 Results of attribution analysis of runoff change in Zhengyi Gorge

水文站	基准期	变化期	贡献量/mm			dR'/mm	dR/mm	δ/mm	贡献率(C)/%		
			P	ET_0	n				P	ET_0	n
正义峡	1970—2004年	2005—2020年	6.11	−1.79	9.98	14.30	13.69	0.61	42.73	−12.52	69.79

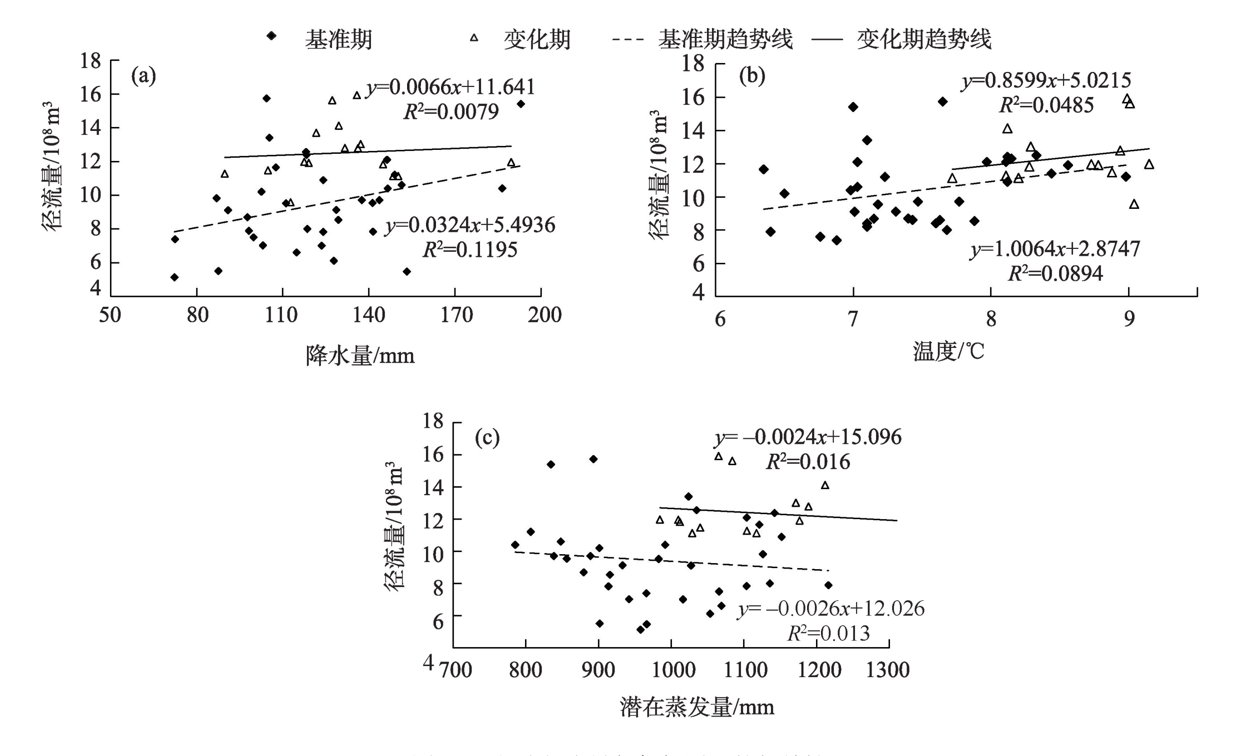


图4　正义峡径流量与气候因子的相关性

Fig. 4　Correlation between runoff and climate factors in Zhengyi Gorge

如图4a所示，1970—2020年黑河中游正义峡径流量变化与降水量P变化趋势基本一致，呈现正相关关系，但相关性不显著。从基准期到变化期径流量随降水量变化的增加率从0.0324减少到0.0066，说明变化期降水对径流的贡献在减弱，影响径流年际间的变化可能还与其他因素有关。由图4b可知，正义峡径流量与气温的相关性呈现微弱正相关，从基准期到变化期径流量随气温变化的增加率从1.0064降为0.8599，说明变化期气温对径流的影响也在减弱。蒸散发是黑河中游地区水分耗散的主要途径之一，受气温变化和下垫面等因素的综合影响，夏季气温高，蒸散发量最大，而冬季气温低，蒸散发量最小[25]。在一定的气候条件下，下垫面条件影响蒸散发进而影响地表径流的形成及其年内分配。由图4c可知，正义峡径流量与潜在蒸发量ET_0的相关性呈现极微弱的负相关，从基准期到变化期径流量随潜在蒸发量变化的下降率从0.0026减小为0.0024，说明变化期潜在蒸发量对径流的影响也在减弱。余加男等[26]认为降水量和上游来水量是黑河中游主要的水分输入变量，其多寡决定了中游地区蒸散发量的大小以及可利用水分的多少。在多年平均的时间尺度上，流域水量输入（降水和上游来水）一定的情况下，气温越高，蒸散发量愈大，径流量愈小。

结合上述气候因子的影响分析，本文表3计算得出的降水量（P）、潜在蒸发量（ET_0）对正义峡径流量变化的影响结果，与相关学者[13,27]的研究结果一致，即气候因子中的降水对黑河中游正义峡径流演变的影响占主导作用。

3.2　人类活动对径流的影响

黑河中游特殊的下垫面和地质构造条件，致使区域径流的形成汇集及转换可能还会更复杂一些[28]。相关研究[29-30]表明，下垫面参数（n）与流域的地形、土壤性质、土地利用类型以及植被覆盖度等因素有关，且一般考虑到在较短时间内流域的地形和土壤性质变化较小，可忽略不计，因此，流域下垫面参数（n）的变化主要用流域的植被覆盖度及土地利用类型变化来反映。下垫面条件变化不仅影响内陆水文循环和流域产汇流过程，对河川径流的二次分配过程也产生复杂的影响。为进一步分析人类活动对河川径流变化的影响，本文主要采用1981—2019年黑河中游地区的归一化植被指数（NDVI）与土地利用面积变化指标，对正义峡径流量年际变化的影响进行分析，如图5所示。

由图5a可知，1981—2004年黑河中游植被NDVI呈现下降趋势，下降速率为0.0039，尤其在

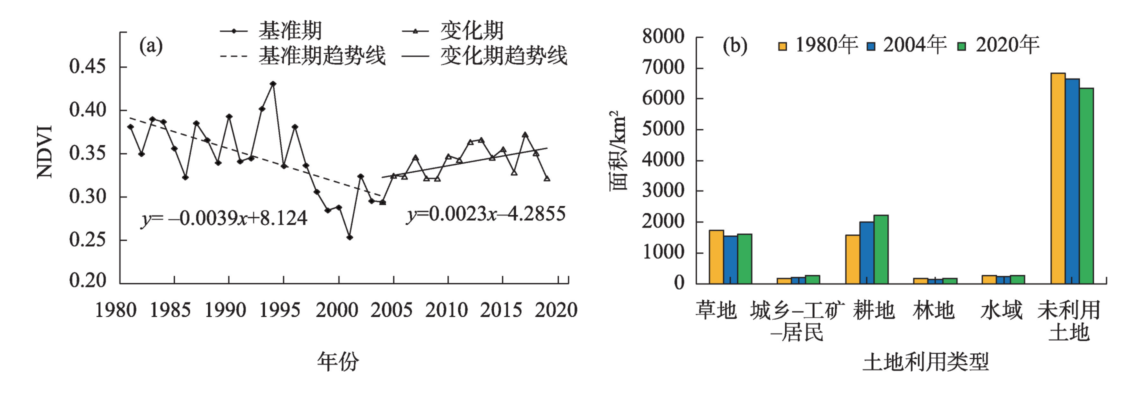


图5　黑河中游NDVI及土地利用面积变化

Fig. 5　NDVI and land use area changes in the middle reaches of Heihe River

1994—2004年,随着草地、林地面积的减少,植被NDVI呈明显下降趋势。2004年之后草地、林地面积有小幅度增加,NDVI呈现波动上升趋势,上升速率较小,仅为0.0023。下垫面植被NDVI的这种变化情况与正义峡径流突变发生在2004年相对应,说明进入变化期(2005—2020年)黑河中游的植被覆盖度有所增加,也表明这一时期由于相关水资源管理政策的实施,水资源重复利用率不断提高,加之节水型高效农业的推广,农业用水量减少,生态植被面积有所增加,进而对正义峡径流量的增加产生正影响。但从图5b的土地利用情况可以看出,变化期耕地面积,城乡、工矿、居民用地面积的持续增加将会影响植被生态用水,进而影响生态植被的进一步恢复和发展。变化期植被NDVI虽呈增大态势,但未达到基准期的植被覆盖水平,表明人类的一些活动对黑河中游生态植被的恢复还存在一定的负面影响。

黑河中游是黑河流域水土资源开发利用程度最高的区域。已有研究[28-30]显示,随着人口增加和社会经济发展,研究区耕地面积、城镇化建设以及水利设施不断增加,极大地改变了中游下垫面条件。由表4可知,在变化期内(2005—2020年),耕地面积、建设用地面积增长率分别为10.33%、39.32%,人均GDP的增长率达到了305.38%。同时,农业用水量、工业用水量、生活用水量则呈现下降趋势。这与张掖市进一步深化节水型社会建设,积极落实《黑河流域近期治理规划》中的目标任务,调整产业结构比例,统筹地表水和地下水资源,不断提高水资源重复利用率等措施有关。黑河中游也属于绿洲灌溉农业区,农业灌溉用水约占中游总用水量的80%以上,在变化期内实际耕地灌溉率虽增加5.13%,但农业用水量降低了14.62%,说明中游节水型高效农业的发展成效明显。变化期内生态用水降幅最大,减少了60.31%,说明中游地区为了保证农业灌溉用水,挤占了区域生态用水,这也可能是变化期内中游生态植被覆盖度(NDVI)增速缓慢的原因之一。黑河中游地势平坦,河道落差小,在185 km的天然河道上有许多不同规模的蓄水引水工程,但无水电站工程,这些蓄水引水工程在为工农业生产及居民生活提供水源的同时,也不同程度改变了

表4　黑河中游人类活动指标的年际变化

Tab. 4　Interannual variation of human activity indicators in the middle reaches of Heihe River

年份	耕地面积/km²	实际耕地灌溉率/%	人均GDP /10⁴元	建设用地面积/km²	农业用水/10⁸ m³	工业用水/10⁸ m³	生活用水/10⁸ m³	生态用水/10⁸ m³	总用水量/10⁸ m³
2000	1849.67	72.11	0.32	176.73	16.64	0.51	0.37	1.42	18.94
2005	2003.50	85.96	0.93	189.32	15.32	0.66	0.48	1.31	17.77
2010	2133.49	84.65	1.77	200.62	15.67	0.30	0.40	1.22	17.59
2015	2178.12	83.91	3.06	224.57	15.76	0.22	0.41	0.78	17.18
2020	2210.45	81.55	3.77	263.77	13.08	0.10	0.36	0.52	14.06
变化期(2005—2020)变化率/%	10.33	−5.13	305.38	39.32	−14.62	−84.85	−25.00	−60.31	−20.88

中游原河道的径流特征和地表径流分配过程，间接影响区域内土地利用和生态植被的空间格局。

另外，为了遏制黑河下游生态退化的趋势，自2000年8月黑河流域实施了《黑河干流水量分配方案》，黑河中游每年在莺落峡多年平均来水15.8×10^8 m^{3}的情况下分配给正义峡9.5×10^8 m^{3}的下泄水量[15]。截至2020年，累计进入正义峡断面水量逾225×10^8 m^3，占到莺落峡断面来水总量的60.5%，极大地改善了黑河干流下游的生态环境[31]。在干旱地区，基流是河川径流的一部分，基流在维持河道水源稳定性和脆弱荒漠生态系统中发挥着重要作用。廉耀康等[32]分析发现正义峡水文站1957—2017年期间年基流指数值达到了0.7571，调水前后正义峡基流指数变化与地表径流变化不尽同步；调水前，基流呈现减小趋势，地表径流呈现较大的减小趋势；调水后，基流呈现增加趋势，而地表径流呈现更大的增加趋势。可见，黑河中游调水活动，在增加正义峡径流量的同时，无疑也会对中游河道的径流分配、利用以及区域生态环境变化产生较大的影响。

综上所述，正义峡径流量的年际变化与中游地区的气候条件及人类活动息息相关。在自然条件与人类活动作用下，黑河中游地表水与地下水相互转化频繁，降水、蒸发、河道渗漏、灌溉引排水、地下水溢出，形成了干旱区特殊的水资源演变模式。加强对中游正义峡径流演变规律的研究，深化气候变化和人类活动对径流影响程度的认识，对于黑河中游水资源优化配置和管理具有指导意义。

4 结论

本文以正义峡水文站实测年径流量数据为依据，对正义峡水文站1970—2020年径流变化及归因进行了分析，得出以下主要结论：

（1）1970—2020年正义峡径流量年际间波动变化，但总体呈增加趋势；正义峡径流量在2004年发生突变，变异系数C_v由突变前的0.28变为突变后的0.13，表明发生突变后正义峡年径流量变化呈弱变异，径流变化更趋稳定。

（2）变化期内（2005—2020年）正义峡径流量对降水、潜在蒸发和下垫面参数的弹性系数分别为1.40、-0.40、-1.57，表明正义峡径流量对中游下垫面变化最为敏感，降水变化次之，潜在蒸发变化的敏感性最弱。

（3）黑河中游的降水、潜在蒸发和下垫面参数对正义峡径流的贡献率分别为42.73%、-12.52%、69.79%，表明人类活动引起的黑河中游下垫面条件变化是影响正义峡径流量演变的主要原因。但正义峡径流演变不单纯是某一变量（P、ET_0、n）的影响，而是多种变量综合影响的结果。

参考文献（References）：

[1] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313(5790): 1068–1072.

[2] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779–790. [Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Zhan Chesheng, et al. Research progress on the impact of climate change and human activities on the hydrological cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779–790.]

[3] 张强, 胡隐樵, 曹晓彦, 等. 论西北干旱气候的若干问题[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 357–362. [Zhang Qiang, Hu Yinqiao, Cao Xiaoyan, et al. On some problems of arid climate system of Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 357–362.]

[4] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483–493. [Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview[J]. Climate Change Research, 2017, 13(5): 483–493.]

[5] 吴景全, 吴铭婉, 臧传富. 西北诸河流域土地利用变化及土地生态安全评估[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1471–1482. [Wu Jingquan, Wu Mingwan, Land Chuanfu. Land use change and land ecological security assessment in the river basins of Northwestern China[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1471–1482.]

[6] 黄鑫, 程文仕, 李晓丹, 等. 干旱内陆河流域土地利用转型的生态环境效应变化特征及其驱动因素探测[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 324–332. [Huang Xin, Cheng Wenshi, Li Xiaodan, et al. Recognition on the changes and driving factors of eco-environmental effect of land use transformation in arid inland river basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 324–332.]

[7] 王晓杰, 刘海隆, 包安明. 气候变化对玛纳斯河的径流量影响预测模拟分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1220–1228. [Wang Xiaojie, Liu Hailong, Bao Anming. A simulation analysis of the impact of climate change on runoff in the Manas River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(5): 1220–1228.]

[8] 肖森元, 苏军, 杨广, 等. 气候变化和人类活动对玛纳斯河流域径流及干旱的影响[J]. 人民珠江, 2022, 43(7): 21–28. [Xiao Senyuan, Su Jun, Yang Guang, et al. Impact of climate change and human activities on runoff and drought in Manas River Basin[J]. Pearl River, 2022, 43(7): 21–28.]

[9] 孙从建, 陈伟, 王诗语. 气候变化下的塔里木盆地西南部内陆河流域径流组分特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 113-122. [Sun Congjian, Chen Wei, Wang Shiyu. Stream component characteristics of the inland river basin of the Tarim Basin under regional climate change[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 113-122.]

[10] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰, 等. 河西走廊三大内陆河流域出山径流变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 66-72. [Zhang Xiaoxiao, Zhang Yu, Xu Haojie, et al. Mountainous runoff change in three inland river basin in Hexi Corridor and its influencing factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(4): 66-72.]

[11] 张彧瑞. 河西内陆河流域径流变化特征及对气候变化和人类活动的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. [Zhang Yurui. The Characteristic of Runoff and its Response on Climate Change and Human Activities In inland Basins of Hexi Region[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.]

[12] 李秋菊, 李占玲, 王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 31-39. [Li Qiuju, Li Zhanling, Wang Jie, et al. Changes of runoff in the upper reaches of the Heihe River Basin and its attribution analysis[J]. South-to-North Water Transfer and Water Conservancy Technology, 2019, 17(3): 31-39.]

[13] 李芳, 邹松兵, 陆志翔, 等. 气候变暖背景下黄河源区白河和黑河流域径流变化归因分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(1): 56-64. [Li Fang, Zou Songbing, Lu Zhixiang, et al. Attribution analysis of runoff changes in the Baihe and Heihe River Basins in the source area of the Yellow River under the background of climate warming[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2020, 56(1): 56-64.]

[14] Li Z L, Li W, Li Z J, et al. Responses of runoff and its extremes to climate change in the upper reaches of the Heihe River Basin, China[J]. Atmosphere, 2023, 14(3): 539.

[15] 吴凯, 李强坤, 殷会娟, 等. 黑河"97"分水方案下黑河流域径流演变新事实与调水成效分析[C]// 中国水利学会2020学术年会论文集第三分册, 2020: 89-95. [Wu Kai, Li Qiangkun, Yin Huijuan, et al. New facts of runoff evolution and analysis of water transfer effectiveness in Heihe River Basin under the "97" water dividing scheme of Heihe River[C]// The Third Volume of the Proceedings of the 2020 Academic Annual Meeting of the Chinese Hydraulic Engineering Society, 2020: 89-95.]

[16] 张妍, 郭萍, 张帆. 黑河中游农业水资源多目标优化配置[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(5): 185-192. [Zhang Yan, Guo Ping, Zhang Yan. Study on multi-objective optimization allocation of agricultural water resources in the middle reaches of Heihe River[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(5): 185-192.]

[17] 蒋小芳, 段翰晨, 廖杰, 等. 基于多模型的黑河中游甘临高地区土地利用情景模拟[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 178-188. [Jiang Xiaofang, Duan Hanchen, Liao Jie, et al. Multi-model-based simulation of different land use scenarios in Gan-Lin-Gao area in middle reaches of Heihe River[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 178-188.]

[18] 杜伟宏. 塔里木河干流水土资源变化与生态恢复研究[D]. 西安: 长安大学, 2020. [Du Weihong. Study on Changes of Soil and Water Resources and Ecological Recovery in the Main Stream of Tarim River[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.]

[19] 耿文杰. 基于"97"分水方案和"三条红线"的黑河中游水资源配置研究[D]. 西安: 西北大学, 2021. [Geng Wenjie. The allocation of water resources in the midstream of Heihe River for the "97 water diversion scheme" and the "Three Red Lines"[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.]

[20] 梁鹏飞, 辛惠娟, 李宗省, 等. 祁连山黑河径流变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1-14. [Liang Pengfei, Xin Huijuan, Li Zongsheng, et al. Study on the characteristics and influencing factors of runoff changes of Heihe River in Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1-14.]

[21] 陈丽丽, 莫淑红, 巩瑶. 基于Budyko弹性系数法的佳芦河流域径流变化归因识别[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(1): 110-116. [Chen Lili, Mo Shuhong, Gong Yao. Attribution identification of runoff changes in Jialu River Basin based on Budyko elastic coefficient method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(1): 110-116.]

[22] 杨林, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于Budyko假设的洮河与大夏河径流变化归因识别[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8421-8429. [Yang Lin, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Attribution identification of runoff changes in Tao River and Daxia River based on Budyko hypothesis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8421-8429.]

[23] 苗正伟, 路梅, 丁志宏. 基于时变Budyko模型的滹沱河上游径流变化归因分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(7): 29-35. [Miao Zhengwei, Lu Mei, Ding Zhihong. Cause analysis of runoff change in the upper reaches of Hutuo River based on time-varying Budyko-type equation[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2022, 39(7): 29-35.]

[24] 司源, 尹冬勤, 侯胜林, 等. 气候变化及人类活动对黑河流域径流演变影响分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1177-1188. [Si Yuan, Yin Dongqin, Hou Shenglin, et al. Analysis of the impact of climate change and human activities on runoff evolution in the Heihe River Basin[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2018, 26(6): 1177-1188.]

[25] 闫宇会, 薛宝林, 张路方, 等. 基于MOD16产品的黑河流域蒸散量时空分布特征[J]. 节水灌溉, 2019, 44(9): 85-92. [Yan Yuhui, Xue Baolin, Zhang Lufang, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of evapotranspiration in Heihe River Basin based on MOD16 products[J]. Water Saving Irrigation, 2019, 44(9): 85-92.]

[26] 余加男, 李占玲, 冯雅茹. 基于Budyko理论的黑河流域中游地区实际蒸散发估算及其变化归因分析[J]. 节水灌溉, 2022, 47(2): 54-58. [Yu Jianan, Li Zhanling, Feng Yaru. Estimation of actual evapotranspiration in the middle reaches of the Heihe River Basin based on Budyko theory and attribution analysis of its

changes[J]. Water Saving Irrigation, 2022, 47(2): 54−58.]

[27] 邱玲花, 彭定志, 徐宗学, 等. 气候变化和人类活动对黑河中游流域径流的影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2015, 40(9): 17−21. [Qiu Linghua, Peng Dingzhi, Xu Zongxue, et al. Analysis of the impact of climate change and human activities on runoff in the middle reaches of the Heihe River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015, 40(9): 17−21.]

[28] 祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 等. 黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 29−43. [Qi Xiaofan, Li Wenpeng, Cui Huqun, et al. Study on surface water and groundwater transformation mechanism in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 29−43.]

[29] 何旭强, 张勃, 孙力炜, 等. 气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率[J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2884−2890. [He Xuqiang, Zhang Bo, Sun Liwei, et al. Contribution rates of climate change and human activity on the runoff in upper and middle reaches of Heihe River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11): 2884−2890.]

[30] 潘燕辉, 张辉, 马金珠. 气候变化和人类活动对黑河水资源的影响[J]. 人民黄河, 2012, 34(5): 55−60. [Pan Yanhui, Zhang Hui, Ma Jinzhu. The impact of climate change and human activities on the water resources of the Heihe River[J]. Yellow River, 2012, 34(5): 55−60.]

[31] 黑河流域管理局. 见证黑河[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2019. [Heihe River Basin Bureau. Witness the Heihe River[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2019.]

[32] 廉耀康, 楚楚, 杜得彦, 等. 黑河正义峡基流变化分析[C]// 2022(第十届)中国水生态大会论文集, 2022: 394−401. [Lian Yaokang, Chu Chu, Du Deyan, et al. Analysis of base flow change in Heihe Zhengyi Gorge[C]// Proceedings of the 2022 (10th) China Water Ecology Conference, 2022: 394−401.]

Runoff trend and attribution analysis of the Zhengyi Gorge in the middle reaches of the Heihe River

HU Guanglu[1,2], TAO Hu[1], JIAO Jiao[1], BAI Yuanru[1,2], CHEN Haizhi[1], MA Jin[1]

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This study utilized measured runoff data from the Zhengyi Gorge hydrological station in the middle reaches of the Heihe River to analyze the trend and mutation years of the runoff sequence from 1970 to 2020. Various methods, including linear regression, the Mann-Kendall mutation test, the sliding *T* mutation test, the Pettitt test, and cumulative offset verification, were employed for the analysis. Additionally, an attribution analysis of the runoff changes at the Zhengyi Gorge hydrological station was conducted using the Budyko water-energy coupled balance equation. The results indicate the following: (1) Over the study period, the runoff at Zhengyi Gorge showed fluctuations, alternating between periods of abundance and contraction but showed an overall increasing trend. The runoff experienced a mutation in 2004, resulting in a 3.08×10^8 m³ increase in average annual runoff volume, representing a growth rate of 32.7%. (2) In the period after the mutation (2005−2020), the elastic coefficients of runoff in response to precipitation, potential evaporation, and underlying surface parameters were 1.40, −0.40, and −1.57, respectively. The contribution rates of each factor to runoff were 42.73%, −12.52%, and 69.79%, respectively, indicating that runoff is most sensitive to underlying surface changes and that precipitation has a more significant impact on runoff than potential evaporation among climate factors. (3) Under certain regional climatic conditions, the changes in the underlying surface of the middle reaches caused by human activities, such as vegetation cover, land use, and watershed water transfer, are the main reasons for the changes in runoff at Zhengyi Gorge. The research findings can provide a scientific basis for river basin management departments to formulate water resource allocation and utilization plans.

Keywords: runoff change; attribution analysis; coupled energy-water balance equation; climate change; human activity; the middle reaches of Heihe River